第 37 卷第 11 期
2017 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.11
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201603310591
夏楚瑜,李艳,叶艳妹,史舟 刘婧鸣.基于净生产力生态足迹模型的工业碳排放效应、影响因素与情景模拟.生态学报,2017,37(11):3862-3871.
Xia C Y, Li Y, Ye Y M, Shi Z, Liu J M.Analysis of the industrial carbon emission effect based on the Net Primary Productivity Model, its influencing factors and scene simulation.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3862-3871.

基于净生产力生态足迹模型的工业碳排放效应、影响因素与情景模拟

夏楚瑜[1],李 艳[1,*],叶艳妹[1],史 舟[2], 刘婧鸣[3]
1 浙江大学土地科学与不动产研究所, 杭州 310058
2 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058
3 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074

摘要:以不同类型城市东营和滨州为例,采用基于净生产力的生态足迹模型测度 2005—2014 年两市工业碳排放效应,利用弹性系数模型对工业碳排放生态足迹及其影响因素进行对比,通过情景模拟分析了基准和低碳情景下两市的可持续低碳发展潜力。研究结果显示:(1)东营碳排放总量和碳排放强度明显高于滨州, 两市的碳排放生态足迹总体上都处于上升趋势,年均增长率分别为 12.79%和 6.16%,这与两市工业化发展阶段不同有关;(2)2005—2008、2008—2011 和 2011—2014,东营工业碳排放生态足迹当量主导影响因素组合变化为“耕地面积-土地城镇化率-能源结构系数”转化为“耕地面积-人口规模-能源结构系数”到“耕地面积-人口规模-第二产业比重”;滨州 2005—2014 年的主导因素组合一直为“人口规模-土地城镇化率-能源结构系数”;(3)通过情景模拟分析 2020 年东营、滨州的低碳发展潜力:基准和低碳情景下,滨州生态赤字分别为东营的 10 倍和 2.6 倍;就“减排”潜力而言,滨州远远高于东营,但实现低碳情景是工业 GDP 增长从现阶段 20.6%骤降到 6.5%为代价,对产业结构调整升级要求很高。对东营而言,低碳情景的实现不仅要将能源利用效率提高一倍,更要保证大量重要“碳汇”资源的恢复与重建。
关键词:净生产力;生态足迹;影响因素;弹性系数;工业碳排放;情景模拟

Analysis of the industrial carbon emission effect based on the Net Primary Productivity Model, its influencing factors and scene simulation

XIA Chuyu[1], LI Yan[1,*], YE Yanmei[1], SHI Zhou[2], LIU Jingming[3]
1 *School of Public Affairs, Institute of Land Science and Property Management, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*
2 *Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*
3 *School of Public Administrations, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: At present, there are serious environmental problems caused by global warming, primarily resulting from the interaction of industrial fossil fuel emissions and Land-Use and Land-Cover Change (LUCC). According to IPCC reports, the industrial sector is the most important source of fossil fuel consumption, which accounts for 78.75% of the carbon emission to the atmosphere. In China, the annual growth rate of carbon emissions from fossil fuel combustion has been 5.2% since 1978, and the future growth trend is difficult to reverse. Moreover, a lack of ecological security in the implementation of the cultivated land balance policy, the principle of “occupying one up one”, can easily lead local governments to incorrectly understand infinite cultivated land reserve resources. Thus, to explore how natural resources, industrial

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFD0201200);浙江省教育厅重点项目(Z201121260)
收稿日期:2016-03-31; **网络出版日期**:2017-02-22
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liyan522@ zju.edu.cn

development, and restricted cultivated land protection policies affect the ecological pressure of industrial carbon emission in different cities, the present study uses Dongying and Binzhou as examples. Both cities, located in the Yellow River delta, were used to research the ecological pressure of industrial carbon emission based on the Net Primary Productivity Model (NPPM); the elastic coefficient model was applied to analyze changes of influencing factors from 2005 to 2014; and finally, the potential of low-carbon sustainable development using the scene simulation method was measured. Net Primary Productivity (NPP) is employed as a common indicator of biological productivity and the Net Primary Productivity Model (NPPM) can illustrate the interaction between carbon emissions and land carbon sequestration. The following conclusions were reached: (1) carbon emissions and carbon emission intensities of Dongying were significantly higher than that of Binzhou, and the ecological footprint of carbon emissions annually increased by 12.79 and 6.16%, respectively. This is related to the difference of industrial development between the two cities. (2) After analyzing the results of the elastic coefficient model, we found the combination of critical factors of the industrial carbon emission ecological footprint of Dongying changed from a "cultivated land-land urbanization rate-energy structure coefficient" to "cultivated land-population size-energy structure coefficient" to "cultivated land-population size-the proportion of the second industry" from 2005—2008 to 2008—2011 and 2011—2014; that of Binzhou remained a "population size-land urbanization rate-energy structure coefficient" from 2005 to 2014. (3) Through the situational simulation analysis until 2020, we found that under the baseline scenario, the carbon emission ecological deficit of Binzhou was approximately ten times than that of Dongying; under the low carbon scenario, that of Binzhou was only 2.6 times that of Dongying. Regarding the emission reduction potential (the distance between the carbon emission ecological deficit under the baseline scenario and low carbon scenario), the potential of Binzhou was significantly higher than that of Dongying. However, the low carbon scenario of Binzhou is at the expense of a serious slowdown from 20.6 to 6.5% in industry GDP, which needs to forcibly eliminate high energy-consuming enterprises, and economic growth mainly relies on the completion of the third industry. Therefore, there is a very high demand for the readjustment of the industrial structure. Regarding Dongying, the low carbon scenario needs to improve the energy use efficiency by double, and ensure the restoration of large numbers of "carbon sink" resources.

Key Words: net primary productivity model; ecological footprint; influencing factors; elastic coefficient; industrial carbon emission; scene simulation

全球气候变暖与地球系统碳循环的改变密切相关,人类对化石能源的无节制使用被认为是导致温室气体排放的首要原因。根据 IPCC 公布结果,每年人类向大气排放 8.0Pg 碳,其中化石燃料贡献 6.3Gt,工业部门为化石燃料重要消费来源。根据有关部门测算,我国 1978 年以来化石能源燃烧所带来的碳排放年均增速 5.2%,且未来成倍增长趋势难以逆转[1]。另外,森林无节制砍伐、农地不恰当耕作、草场过度放牧等人类对土地利用/覆被的改变(LUCC)强烈影响了"碳汇"分布,是仅次于化石燃料排放的全球第二大源[2]。同时,耕地占补政策执行过程中缺少对生态安全的考虑,"占一补一"的原则容易造成"耕地后备资源无限"的错误认识,一些地方政府为了换取建设用地指标不惜把湿地、林地、草地、生态保护区等开垦为耕地[3],严重破坏生态系统自净能力。近年来越来越频繁的气候危机与以上这些因素有着必然联系,自然资源、工业化发展、约束性耕地政策是如何影响不同城市工业碳排放对生态的压力,这是本研究要探讨的要点。

传统的生态足迹模型基于碳吸收替代原理,忽略了林地以外其他用地的碳吸收贡献[4]。净初级生产力(NPP)指绿色植物单位时间单位面积扣除自身呼吸作用后的生产净值,综合反应了各类土地生产力和碳吸收能力,能够真实反应能源消费的空间占用水平[5],因此被广泛应用于人类对物质资源的消耗与环境压力之间的关联研究。如方恺等[6]在综合考虑能源、大气、植被和土地利用相互作用关系基础上,利用基于 NPP 的生态足迹模型测算全球能源足迹,反应了能源消费的空间占用平均水平;Siche 等[7]将 NPP 模型与能值分析相结合来测算秘鲁的人口承载力,发现其测算值远远低于传统模型的估算结果。学者对碳排放效应影响因素

也进行了广泛的研究:Casler 等[8]采用 KLEM 模型分析了美国碳排放结构,认为新能源的使用是碳排放下降的主要原因;Schipper 等[9]用因素分解法解释了 1990 年以来 13 个 IEA 国家 9 个制造部门碳排放强度增长原因。

由于区域土地利用数据具有一定的保密性,遥感解译结果又有一定的误差,所以目前生态足迹的研究单元以大尺度为主,区域微观尺度研究相对不足,针对生态环境脆弱区的研究更少。但是微观尺度例如市级行政区,是政策实施的重要行政单位,对“减排”政策制定、实施和反馈有重要意义。另外,目前对于不同类型城市碳排放差异研究比较少,特别是针对工业城市和农业城市。现代工业城市和传统农业城市工业化程度和工业结构差异都很大。深入研究同一区域不同类型城市工业碳排放效应和影响因素,有利于提出差别化“减排”政策。

黄河三角洲很大一部分区域位于山东省,同时山东省经济增长对工业依赖程度很高[10]。该区土壤盐碱化普遍,土地退化严重,生态恢复重构能力比较弱[11],属于典型生态脆弱区域,研究工业碳排放对生态环境的压力意义重大。近年来,黄河三角洲地区城市化和工业化发展迅速,同时对自然资源的滥用也极其严重,特别是毁灭森林、排干湿地、城市蔓延等活动,严重破坏生态系统自净能力,导致大量碳被释放到大气中,付出了沉重的生态代价。为了促进黄河三角洲区域社会经济与生态协调发展,探求可持续低碳发展之路,本文以该区域现代工业城市东营和传统农业城市滨州两个典型不同类型城市为例,采用基于 NPP 生态足迹模型测度工业碳排放效应,采用弹性系数对比分析其工业碳排放生态足迹当量主导因素,深入讨论同一区域不同类型城市工业碳排放效应的演变机理和驱动因素的异同, 最后通过情景模拟分析了基准和低碳情景下东营和滨州的可持续低碳发展潜力。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区

东营市、滨州市共处黄河三角洲腹地,是黄三角高效生态经济区的核心城市,是“山东半岛蓝色经济区”开发的重点区域。

东营多年平均气温 12.8℃,年平均降水量 555.9mm。全市土地总面积 8243.26km^2,黄河流经全市 138km,海岸线长达 413km。至 2014 年底,东营市耕地总面积 223154.19hm^2,其中水浇地占耕地面积的 74.72%。东营以丰富的石油、天然气资源以及低廉的劳动成本和便利的港口资源成为我国东部工业强市,2014 年以人均 GDP169000 元,位列山东省首位,三次产业结构比为 3.6∶68.4∶28.0,快速增长的经济社会发展也对生态环境提出了更高要求。

滨州年平均降水量 632.0 mm,多年平均气温 13.5℃。全市土地总面积 9445km^2,海岸线长 238.9km。滨州耕地资源丰富,到 2014 年底,全市农用地面积为 570994.68hm^2,其中耕地面积为 465914.81hm^2,占全市农用地面积的 82%,远远高于全国的 20.9%的平均水平。2014 年人均 GDP 60800 元,位列山东省第七,三次产业结构比例为 9.7∶50.3∶40.0。滨州是农业大市,已初步搭建起商品粮、棉花、蔬菜、食用菌、桑蚕、水果、畜牧、水产等八大主导产业,同时工业发展在省内处于较落后位置。

1.2 数据来源

本文主要研究工业化进程中化石燃料所引起的碳排放生态足迹当量,能源数据分别来源于 2006 到 2015 年的东营与滨州统计年鉴中的工业部分。两市土地利用数据来自于两市国土部门提供的历年土地利用变更调查数据。

2 研究方法

2.1 工业碳排放测算方法

工业碳排放主要分为能源燃烧碳排和工业过程排放,本文仅讨论前者,其主要来源是原煤、焦炭、汽油、煤

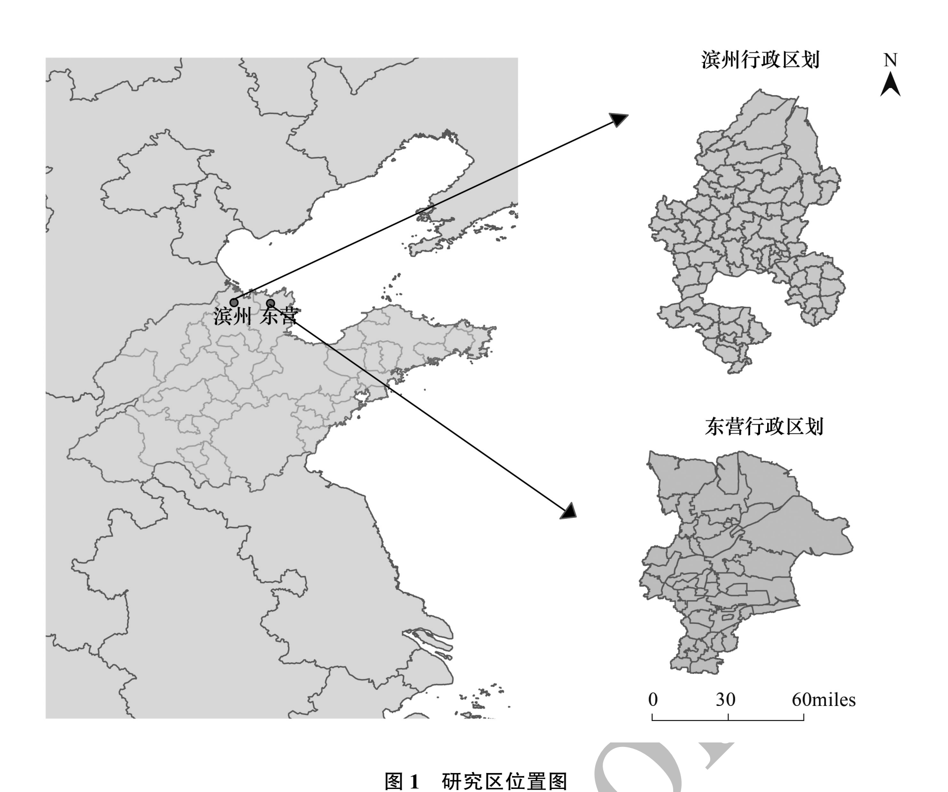


图 1　研究区位置图

Fig.1　Location of the study area

油、柴油、燃料、天然气和电力等能源,计算时将其消耗量换算成标准煤量,采用 IPCC 提供的计算公式:

$$C = \sum C_i = \sum E_i \times K_i \tag{1}$$

式中,C 为碳排放量,E_i为第 i 种能源消耗的标准煤量,K_i为第 i 中能源的能源排放系数(表 1)。

表 1　能源碳排放系数表

Table 1　The referenced table of carbon emissions coefficients

能源类型 Type	标准煤换算系数 Conversion coefficient of standard coal	碳排放系数 Carbon emission coefficient	能源类型 Type	标准煤换算系数 Conversion coefficient of standard coal	碳排放系数 Carbon emission coefficient
煤炭 Raw coal	0.7143	0.7559	焦炭 Coke	0.9714	0.8550
原油 Crude oil	1.4286	0.5857	汽油 Gasoline	1.4714	0.5538
煤油 Kerosene	1.4714	0.5714	柴油 Diesel oil	1.4571	0.5921
燃料油 Fuel oil	1.4286	0.6185	天然气 Natural gas	1.2143	0.4483
电力 Electricity	0.4040	0.7935			

该表的系数来源自文献[12]

2.2　基于 NPP 的生态足迹当量测算

生态足迹当量用以测度人类能源消费碳排放对生态空间的占用情况[13]。本文综合考虑 USDE(美国能源部)公布的全球生态用地的 NPP 值和 Venetoulis 等[14]的研究成果(表 2),其生态足迹当量公式如下[6]:

$$\mathrm{EEF} = \frac{C}{\mathrm{NPP}} = \frac{\mathrm{CO_2}}{\dfrac{\sum A_j \times \mathrm{NPP}_j}{\sum A_j}} \tag{2}$$

式中,EEF 为工业碳排放的生态足迹当量,C 是工业生产能源消费的碳排放总量,NPP_j是第 j 类生态系统的净

初级生产力,A_j为第 j 类生态系统对应的土地面积。

表 2 已经研究公布的各地类 NPP

Table 2 Global average NPP of different ecosystems Source

	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water body	海洋 Ocean	建设用地 Built land	湿地 Wetland
NPP/($tC\ hm^{-2}\ a^{-1}$)	4.243	6.583	4.835	5.344	0.959	0.997	11.800

该表的系数来源自文献[12]

2.3 碳排放生态足迹当量弹性系数计算方法及影响因子选择

本文通过弹性系数来测度各因素对碳排放生态足迹的驱动作用,其计算公式如下:

$$n = \frac{\Delta EEF/EEF}{\Delta X/X} \tag{3}$$

式中,X 为影响碳排放生态足迹当量的因素,n 为碳排放生态足迹当量弹性系数。

在研究人类活动对自然环境压力方面,通常采用人口、富裕和技术的随机回归模型 STIRPAT[15]。利用该模型可分析能源足迹与人口、现代化指标(城市化、工业化)之间的关系。本文基于扩展的 STIRPAT 模型,选择人口规模、单位 GDP 耗能、能源结构系数、土地城镇化率、耕地面积、第二产业比重作为影响东营市和滨州市的碳排放生态足迹的因素[16-18]。其中能源结构系数是碳排放总量与能源消费总量(标准煤)之比,反应了节能水平。

2.4 生态足迹当量赤字计算方法

本文采用生态足迹当量赤字来衡量不同地区的环境可持续性。生态足迹当量赤字的计算公式为[19]:

$$EEFD = EEF - EEFB \tag{4}$$

式中,EEFD 为生态足迹当量赤字,EEF 为生态足迹当量,EEFB 为生态足迹当量边界。当 EEF 大于 EEFB 时,产生生态赤字,赤字越大说明环境越不可持续。方恺等[20]基于 Rockström 的行星碳边界的两项控制变量(大气 CO_2浓度 $\leqslant 350\times10^{-6}$,辐射强迫值 $\leqslant 1\ W/m^2$),提出了各国的人均碳边界阈值,统一设定为 $2.5tCO_2$-eq/a。IPCC 报告指出全球 75%的“碳源”来自城市地区,故本文以 $1.875tCO_2$-eq/a 作为工业碳环境边界。

3 研究结果

3.1 碳排放、强度和生态足迹当量变化分析

从两市工业碳排放总量(图 2,图 3)来看,东营由于工业发展程度远远高于滨州,其碳排放总量和排放强度都明显高于滨州。从 2005—2014 年,滨州碳排放强度减少了 68.8%,而东营则呈现阶段性特征:2005—2008 年减少了 18.34%,2008—2014 年增加了 36.01%。究其原因主要是:(1)东营 2005—2007 重工平均增长速度(16.7%)远远低于轻工业(59.7%),同时期滨州重工业平均增长速度(29.6%)与轻工平均增长速度(29.9%)相差无几,但是很多重工行业都存在不同程度的产能过剩。2008 年金融危机全面爆发,国外需求大幅下降,严重冲击滨州重工业发展;(2) 2005—2007 滨州霍夫曼系数变化为:1.63—1.58—1.30,同时期东营的霍夫曼系数变化为:0.67-0.51-0.3。根据霍夫曼系数分级表(表 3),东营处于工业化第四阶段,工业发展已具备一定基础,金融危机对于东营是一次工业转型的契机,大部分粗放型工业企业遭到淘汰,科技集中型工业得到发展。而尚处于第二阶段的滨州工业产业大多以初级加工产品为主,工业基础薄弱,难以将危机化为契机。

从工业碳排放生态足迹当量来看,东营和滨州碳排放生态足迹当量总体上都处于上升趋势,年均增长率分别为 12.79%和 6.16%(图 3)。2012 年之前,滨州碳排放生态足迹当量高于东营市,2012 年之后被东营超过。由图 4 可见,与滨州相比,东营拥有大量湿地和水体等“碳汇”资源。随着城市化发展,从 2005 年到 2014 年,东营建设用地幅增达 29%,耕地增加了 1.6%,围湖造田、围河造田、毁林造田等补充耕地的行为使得湿地

和林地分别减少了 1.7%和 4.7%,生态系统自净能力受到严重威胁。同时期滨州建设用地只增加 9%,湿地资源未出现明显减少,而林地还增加了 26%,生态服务系统维持稳定。

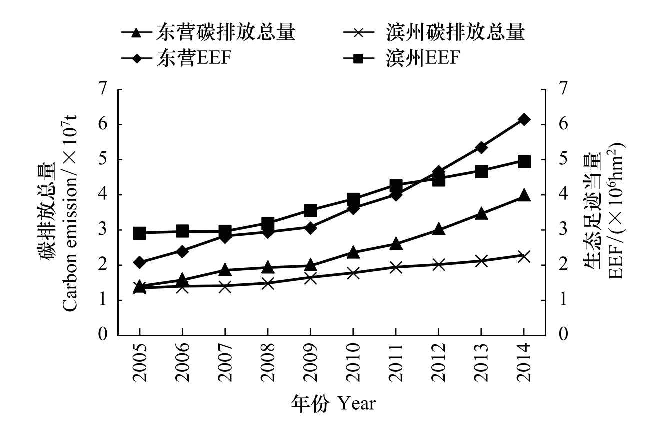


图 2　东营和滨州碳排放和生态足迹变化图

Fig. 2　Changes of carbon emission intensity and ecological footprint in Dongying and Binzhou city

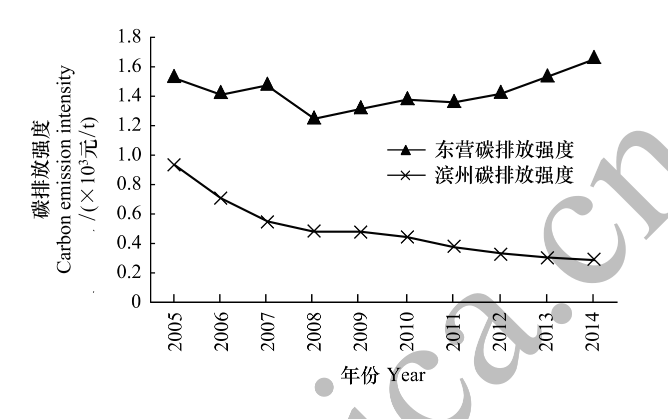


图 3　东营和滨州碳排放强度变化图

Fig. 3　Changes of carbon emission intensity in Dongying and Binzhou city

表 3　霍夫曼系数分级表

Table 3　Hoffman coefficient classification table

霍夫曼系数 Hoffman coefficient	工业化阶段 Industrialization stage	霍夫曼系数 Hoffman coefficient	工业化阶段 Industrialization stage
5(±1)	工业化第一阶段	2.5(±1)	工业化第二阶段
1(±0.5)	工业化第三阶段	<1	工业化第四阶段

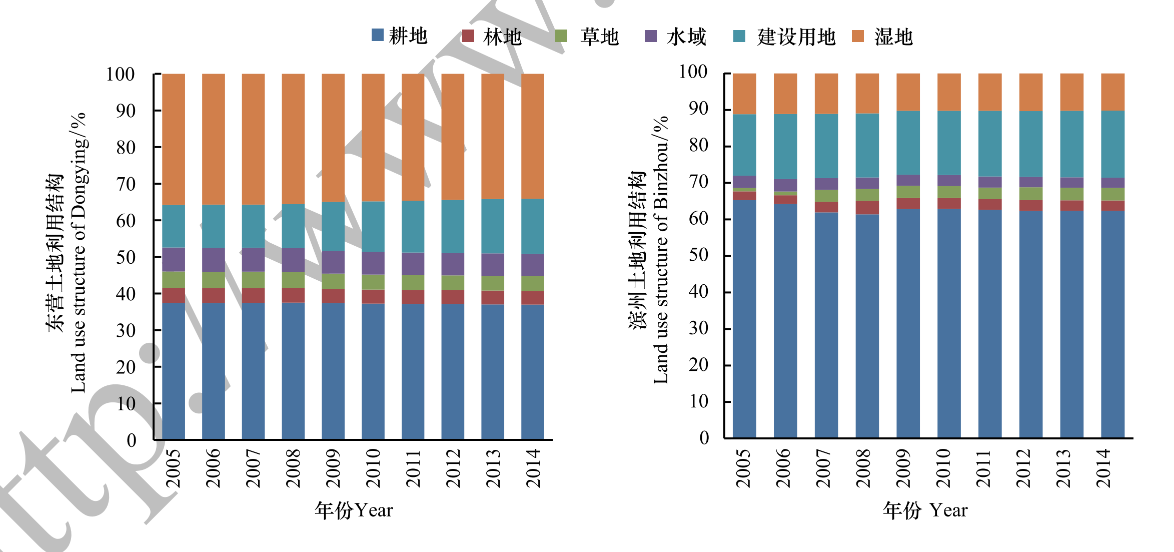


图 4　东营和滨州土地利用结构变化图

Fig.4　Changes of land use structure in Dongying city and Binzhou city

3.2　碳排放生态足迹当量影响因素分析

3.2.1　主导促进因素分析

基于碳排放生态足迹弹性系数确定引起东营工业碳排放生态足迹当量增加的主导因素包括耕地面积、土地城镇化率和人口规模,引起滨州工业碳排放生态足迹当量增加的主导因素是土地城镇化率和人口规模(表 4)。

将东营市工业碳排放生态足迹的主导促进因素划分为 2 个时期:2005—2008 为耕地面积-土地城镇化率主导时期,2008 到 2014 为耕地面积-人口规模主导时期。东营 2008 年工矿用地占建设用地总面积 64%,远远高于 10%到 15%的合理水平[21],土地城镇化质量较低。2008—2014 以耕地面积和人口规模为前两位影响因素,而土地城镇化率的影响作用降低。这是因为受国际金融危机影响工业品出厂价格持续走低,工业用地比例持续下降,土地城镇化的质量逐渐提高。总体而言,耕地面积的碳排放生态足迹当量弹性系数平均值远远大于土地城镇化率和人口规模的碳排放生态足迹当量弹性系数平均值。显而易见,耕地一直是碳排放生态足迹增长主导因素。根据土地利用变更调查数据,2004 到 2012 东营市年均新增建设用地占耕地 552hm^2。而根据国土资源部"占一补一"的耕地占补平衡和保护政策,需要补充至少同等数量的耕地。在这种情况下,大量湿地、林地被开垦成耕地,而这两类生态用地恰恰是重要碳汇。据报道,2005 年到 2008 年,东营市 14%的灌丛湿地、芦苇湿地与河流湿地转化为耕地[22],生态系统自净能力受到威胁。

对滨州而言,2005—2014,其工业碳排放生态足迹当量促进因素一直为人口规模-土地城镇化率组合。人口规模和土地城镇化率的碳排放生态足迹当量弹性系数平均值分别为 31.76 和 14.73,人口规模一直是滨州碳排放生态足迹增长的第一位促进因素。从 2005 至 2014 年,滨州人口城镇率和土地城镇化率的年均增长数分别是和 7.4%和 5%,,大量新增非农人口因工作、住等问题间接产生大量生产能耗。另外,工业用地规模年均增长 17.8%,以工业化为驱动的低质量城镇化拉动了能源消费。按照平均人口城镇化率和 Northam 城镇化发展三阶段划分思想[23],滨州尚属于第二阶段初期,人口城镇化水平与碳排放强度呈倒 U 型关系,人口城镇化是促进碳排放的增加主要推动力[24]。

两市相比,耕地并不是促进滨州工业碳排放主导因素,因滨州本身为农业大市,耕地及后备资源比较丰富,并不像东营那样需要侵占其他生态用地来保证耕地占补平衡;滨州碳排放促进主导因素长期以来比较稳定,而东营市却有阶段性变化,主要原因是东营市已经进入工业化转型和城市化转型时期,越来越开始重视工业化和城市化质量。

表 4 碳排放生态足迹促进因素(1—2 位组合序列)

Table 4 The series of 1st and 2nd promoting factors of EEF

城市 City	年份 Year	第一位因素 1st promoting factor	弹性系数平均值 Mean value of elastic coefficient	第二位因素 2nd promoting factor	弹性系数平均值 Mean value of elastic coefficient
东营	2005—2008 2008—2014	耕地面积	200.15	土地城镇化率 人口规模	10.3 35.6
滨州	2005—2014	人口规模	31.76	土地城镇化率	14.74

3.2.2 主导抑制因素分析

对于东营而言,2005—2011 年和 2011—2014 年两个阶段,工业碳排放生态足迹的主导抑制因素分别为能源结构系数和第二产业比重,其弹性系数平均值分别为-23.4 和-7.4(表 5)。主导抑制因素变化是因为 2008 年金融危机对于粗放高耗能型工业产生巨大冲击,但这同时也是淘汰落后产能企业、促进工业结构升级的一个契机,但第二产业发展的阶段性特征变化对能源效率的提高具有滞后性[25]故其减排效应也有一定的滞后性。

对于滨州,工业碳排放生态足迹的抑制主导因素一直为能源结构系数,其弹性系数平均值为-11.9。一方面滨州所处的工业化初期发展阶段决定了其能源消费以煤炭为主,能源调整结构的潜力很大;另一方面,滨州拥有丰富的生物质能,政府大力推进秸秆等生物质废料、城市垃圾在燃料方面的应用。

两市最大的区别在于东营的主导抑制因素逐渐由能源结构系数转变为第二产业比重,滨州的抑制作用一直为能源结构系数。共同点在于两市抑制因素对生态足迹当量的影响作用并不能抵消其他促进因素的作用,未来"减排"任道而重远。

表 5　碳排放生态足迹抑制主导因素

Table 5　The series 1st inhibiting factor factors of EEF

城市 City	年份 Year	第一位因素 1st inhibiting factor	弹性系数平均值 Mean value of elastic coefficient
东营	2005—2011	能源结构系数	-23.4
	2011—2014	第二产业比重	-7.4
滨州	2005—2014	能源结构系数	-11.9

由于抑制因素比较少,则取第一位

3.2.3　次要因素分析

单位 GDP 耗能代表了能源利用水平和节能程度,对碳排放生态足迹影响并不大,但数值上有正负变化。由图 5 可知, 2008 以后东营单位 GDP 耗能的碳排放生态足迹当量弹性系数出现负值,这是因为金融危机淘汰了一部分粗放高耗能企业,之后能源利用效率开始提升,尽管提升得并不稳定,但工业逐步向集约、低耗能发展。对滨州而言,碳排放生态足迹当量弹性系数虽有波动但是一直为正,说明能源利用水平一直没有很大提升,主要是因为工业基础比较薄弱且工业转型比较困难。

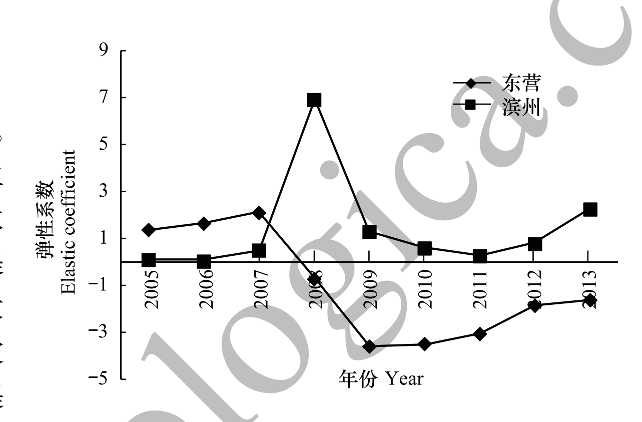


图 5　东营和滨州碳排放生态足迹主要抑制因素变化

Fig.5　Change of minor influencing factor of EEF

3.3　低碳发展潜力情景模拟

3.3.1　情景构建

以 2020 年为目标期,采用情景模拟方法,设置东营、滨州两市工业碳排放生态足迹当量赤字的基准、低碳两种情景考察不同减排政策、土地利用和管理方式、经济发展模式下两市工业碳排放可持续潜力。具体参数设定见表 6。

(1)基准情景　依据城市近年来工业 GDP、人口增长、单位工业 GDP 碳排放变化率和 NPP 值分别以 2011—2014 和 2005—2014 为东营和滨州情景设定参数惯性发展参考时期。建设用地规模预测依照土地利用规划(2006—2020)最大预期性规模:东营和滨州分别为 129173hm^2 和 167130hm^2。

(2)低碳情景　在基准情景的基础上,结合“十三五”规划要求 GDP 增速最低为 6.5%和全面建设小康社会要求人口增长率在 4‰以下的目标,考虑“哥本哈根”会议达成的减排目标(2020 年单位 GDP 碳排放比 2005 年减少 40%—45%)和两市生态保护相关规划、政策措施(《东营自然保护区规划》规定至 2020 年湿地恢复 7641hm^2,植物保护与植被恢复 4599hm^2),实现低碳发展的目标。;建设用地规模按照惯性期发展进行预测:东营和滨州分为 98959 和 154121hm^2。

表 6　东营、滨州情景设定及参数表述

Table 6　Scenario settings based on current status in Dongying and binzhou city

行政区 District	情景设定 Scenario setting	参数设定 Parameter setting			
		工业 GDP 变化率	人口变化率	单位工业 GDP 碳排放变化率	NPP 值
东营	基准	7.5%	7‰	-6.7%	6.15
	低碳	6.5%	4‰	-13.4%	6.46
滨州	基准	20.6%	3.6‰	14.2%	4.45
	低碳	6.5%	3.6‰	-3%	4.54

3.3.2　情景模拟分析

基于以上情景设置,得到东营、滨州不同情景下的人均碳排放生态足迹当量赤字。

东营基准、低碳情景下,人均碳排放生态足迹当量赤字分别为 1 和 0.5 tC/hm^2,滨州基准和低碳情景下的人均碳排放生态足迹当量赤字分别为 9.7 和 1.34 tC/hm^2。

基准情景下,经济、人口增长仍然保持惯性发展,工业依旧是拉动 GDP 的主力,生态保护政策沿用当前现行政策。按照这种惯性发展,两市人均碳排放生态足迹当量赤字仍远远高于我国平均水平[19],其中滨州的生态赤字为东营的近十倍。低碳情景下,两市生态赤字明显下降,其中滨州为东营的 2.6 倍。两市低碳情景的实现都要求土地利用规划、自然保护区规划、城市生态规划等多项规划能够有效执行到具体地块上,这对部门之间的合作、协调要求非常高。就"减排"潜力而言,滨州远远高于东营,但是这种低碳情景是以滨州的工业 GDP 增长从现阶段 20.6%骤降到 6.5%为代价,需要对工业发展实施非常严格的管制措施,强制淘汰高耗能企业,经济增长主要依靠第三产业完成,对产业升级要求很高。因此滨州政府急需转变经济发展方式,加强技术创新体系建设,促使工业发展阶段由初级向高级、低碳化转化。尽管减排短期来看会延缓滨州经济发展,对于城市产业结构优化和资源环境协调发展是有益的。对于东营而言,低碳情景的实现不仅要将能源利用效率提高一倍,更要保证重要"碳汇"的恢复与重建。由于黄河三角洲湿地生态系统本来主要是临河近海的脆弱盐碱地,黄河淤积而成的沙性土壤一旦表层裸露很容易荒漠化,7641hm^2 的湿地恢复计划行之不易。

4 结论和建议

本文利用基于净初级生产力的碳排放生态足迹方法和弹性系数分析方法,对比分析了东营和滨州两市在工业化过程中对自然资源及其生态系统服务的消耗的异同,探讨了不同时期其工业碳排放生态足迹当量的主导因素和次要因素,最后通过情景模拟分析了基准和低碳情景下两市可持续低碳发展潜力。研究结论主要体现在以下方面:

(1)东营碳排放总量和碳排放强度明显高于滨州,两市的碳排放生态足迹总体上都处于上升趋势,年均增长率分别为 12.79%和 6.16%。

(2)东营的工业碳排放生态足迹影响因素变化可以分为 2005—2008 到 2008—2011 到 2011—2014 这 3 个阶段,主导因素的组合变化由"耕地面积-土地城镇化率-能源结构系数"转化为"耕地面积-人口规模-能源结构系数"到"耕地面积-人口规模-第二产业比重"。滨州 2005—2014 年的主导因素组合一直为"人口规模-土地城镇化率-能源结构系数"。值得注意的是,耕地面积长期是东营的主导因素,这与东营本身自然资源禀赋密切相关。城市化进程中,东营为了保证"耕地占补平衡",大量重要"碳汇"(湿地、林地)被开垦成耕地,严重影响自然生态系统自净能力。滨州为农业大市,耕地资源及其后备资源丰富,生态用地未受到"耕地占补平衡"政策的强烈影响。

(3)东营和滨州分别处于工业化第四阶段和第二阶段,2008 年金融危机以后,东营碳排放强度呈上升趋势,而滨州持续下降,这与两市工业化城市化发展阶段显著相关。面对金融危机,东营已经累积一定的资金和技术,大部分粗放工业企业遭到淘汰,科技集中型工业得到发展,更容易进行工业升级,而滨州工业化发展处于较初级阶段,工业产业以初级加工产品为主,技术效率和水平较低,转型困难。

(4)通过情景模拟分析 2020 年东营、滨州的低碳发展潜力发现,基准和低碳两种情景下,滨州的生态赤字分别为东营的近 10 倍和 2.6 倍。就"减排"潜力而言,滨州远远高于东营,但是这种低碳情景是以滨州的工业 GDP 增长从现阶段 20.6%骤降到 6.5%为代价,需要实施非常严格的工业发展管制措施,对产业结构调整和转型升级要求很高。对东营而言,低碳情景的实现不仅要将能源利用效率提高 1 倍,更要保证大量重要"碳汇"资源的恢复与重建。

鉴于以上研究结论,对东营和滨州"减排"可持续发展提出以下差别化建议:

就东营而言,一方面近期应逐步实现重要"碳汇"(湿地、林地)的恢复,加强自然生态系统的自净能力;另一方面在土地利用规划实施过程中,要加强"耕地占补平衡"政策的监督,不能以牺牲生态用地为代价盲目追求"占一补一"。对滨州来说,加快淘汰粗放高耗工业,大力引入先进成熟的节能工艺和设备,推进工业升级

和产业结构调整并大力发展第三产业以保证经济活力。

参考文献(References):

[1] 卢娜, 曲福田, 冯淑怡, 邵雪兰. 基于 STIRPAT 模型的能源消费碳足迹变化及影响因素——以江苏省苏锡常地区为例. 自然资源学报, 2011, 26(5): 814-824.

[2] 韩骥, 周翔, 象伟宁. 土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展. 生态学报, 2016, 36(4): 1152-1161.

[3] 孙蕊, 孙萍, 吴金希, 张景奇. 中国耕地占补平衡政策的成效与局限. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(3): 41-46.

[4] Van Der Voet E. Books: our ecological footprint: reducing human impact on the earth. Journal of Industrial Ecology, 1999, 3(2/3): 185-187.

[5] 方恺, 董德明, 沈万斌. 生态足迹理论在能源消费评价中的缺陷与改进探讨. 自然资源学报, 2010, 25(6): 1013-1021.

[6] 方恺, 董德明, 林卓, 沈万斌. 基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法. 生态学报, 2012, 32(9): 2900-2909.

[7] Siche R, Agostinho F, Ortega E. Emergy net primary production (ENPP) as basis for calculation of ecological footprint. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 475-483.

[8] Casler S D, Rose A. Carbon dioxide emissions in the U.S. economy: a structural decomposition analysis. Environmental and Resource Economics, 1998, 11(3/4): 349-363.

[9] Schipper L, Murtishaw S, Khrushch M, Ting M, Karbuz S, Unander F. Carbon emissions from manufacturing energy use in 13 IEA countries: long-term trends through 1995. Energy Policy, 2001, 29(9): 667-688.

[10] 王敬华. 山东省能源消费分析及其优化策略. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 51-59.

[11] 常春艳, 赵庚星, 李晋, 王凌, 王卓然. 黄河三角洲典型生态脆弱区土壤退化遥感反演. 农业工程学报, 2015, 31(9): 127-132.

[12] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 崔青春, 陶云. 中国土地利用碳排放及其空间关联. 经济地理, 2015, 35(3): 154-162.

[13] 吴文佳, 蒋金亮, 高全洲, 蒋海兵. 2001-2009 年中国碳排放与碳足迹时空格局. 生态学报, 2014, 34(22): 6722-6733.

[14] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. Environment, Development and Sustainability, 2008, 10(4): 441-469.

[15] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. Human Ecology Review, 1994, 1: 277-300.

[16] Wang Z H, Yang L. Indirect carbon emissions in household consumption: evidence from the urban and rural area in China. Journal of Cleaner Production, 2014, 78: 94-103.

[17] 杨足膺, 赵媛, 付伍明. 基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析. 生态学报, 2010, 30(24): 6741-6748.

[18] 张维阳, 段学军, 于露, 张伟, 戚晓明. 现代工业型与传统资源型城市能源消耗碳排放的对比分析——以无锡市与包头市为例. 经济地理, 2012, 32(1): 119-125.

[19] 方恺. 基于足迹家族和行星边界的主要国家环境可持续性多维评价. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1868-1875.

[20] 方恺, 段峥. 全球主要国家环境可持续性综合评估——基于碳、水、土地的足迹-边界整合分析. 自然资源学报, 2015, 30(4): 539-548.

[21] 汪群芳, 李植斌. 杭州市土地利用结构与效率研究. 国土资源科技管理, 2005, 22(4): 5-9.

[22] 万红. 基于 RS 与 GIS 的黄河三角洲湿地信息提取与分析研究[D]. 济南: 中国石油大学(华东), 2010.

[23] 王建军, 吴志强. 城镇化发展阶段划分. 地理学报, 2009, 64(2): 177-188.

[24] 秦耀辰, 荣培君, 杨群涛, 李旭, 宁晓菊. 城市化对碳排放影响研究进展. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1526-1534.

[25] 王强, 郑颖, 伍世代, 李婷婷. 能源效率对产业结构及能源消费结构演变的响应. 地理学报, 2011, 66(6): 741-749.